西北干旱荒漠绿洲区葡萄园水热通量特征及其主要影响因素

朱永泰，陈惠玲，徐聪，秦文华，张扬，何力扬，朱高峰*

（兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000）

摘要：为提高干旱绿洲区农田地表过程的科学认识及改善农业水管理，该文基于涡度相关技术，运用葡萄园生长季能量平衡观测资料，分析了不同时间尺度的水热通量变化特征，以及干旱平流和冠层导度 (G_c) 在不同生长阶段上对水热通量的影响。此外，我们应用通径分析研究了环境因子对潜热通量（*LE*）的影响路径和程度。研究结果表明：（1）日尺度上，*LE* 呈现出不同程度多峰状；其余水热通量总体上呈单峰状。整体上，各生长阶段日间净辐射（R_n）>*LE* >感热通量（*H*）>土壤热通量（*G*）。*G* 相较于 R_n 呈现出明显的滞后现象。（2）整个生长季上，*LE* 和 *H* 分别占白天可利用能量（R_n–*G*）的 86%和 14%，表明 *LE* 始终是白天葡萄园可利用能量的主要消耗项。干旱平流对白天 *LE* 的贡献范围为 5%~59%，全生长季平均贡献为 28%；G_c 对 *LE* 的影响在生长季上呈动态变化，且在新梢生长期和落叶期对 *LE* 的影响强于中间生长阶段。（3）*LE* 主要受 R_n 的影响，饱和水汽压差（VPD）和气温（*Ta*）对 *LE* 的影响程度相近且仅次于 R_n。通经分析表明，R_n 主要通过直接作用方法影响 *LE*，VPD 和 *Ta* 主要通过 R_n 对 *LE* 产生间接作用。总之，西北干旱荒漠绿洲葡萄园水热通量存在明显的日和季节变化特征，环境因子对其影响明显且各自影响程度与路径存在差异。

关键词：干旱区，葡萄，水热通量，干旱平流，通径分析，影响因素

中图分类号：Q948; S663.1　　　　**文献标识码：**A

Characteristics and influencing factors of water and heat fluxes over an vineyard in arid desert oasis region in the Northwest China

ZHU Yongtai, CHEN Huiling, XU Cong, QIN Wenhua, ZHANG Yang, HE Liyang, ZHU Gaofeng*

(*College of Resources and Environment, Lanzhou University*, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To improve our understanding of farmland surface process and agricultural water management in arid oasis area, we analyzed the characteristics of water and heat fluxes at different time scales, and the influence of arid advection and canopy conductance (G_c) on water and heat fluxes at different growth stages. In addition, we used path analysis to study the influence path of environmental factors on latent heat flux (*LE*). In this paper, the water and heat fluxes were measured by eddy-covariance in 2017. The results were as follows: (1) *LE* showed multiple peaks, while the other fluxes were basically unimodal shapes at the daily scale. On the whole, the values of daily net radiation (R_n) were maximum, followed by *LE*, sensible heat flux (*H*) and soil heat flux (*G*) at each growth stage. The variation of diurnal *G* showed obvious lagged effect compared

---

基金项目：国家自然科学基金面上项目（41871078）[Supported by National Natural Science Foundation of China (41871078)]。

第一作者：朱永泰（1997–），硕士，研究方向为生态水文，(E–mail) zhuyt20@lzu.edu.cn。

***通信作者：**朱高峰，教授，博士生导师，研究方向为生态水文，(E–mail) zhugf@lzu.edu.cn。

to that of R_n. (2) *LE* and *H* accounted for 86% and 14% (respectively) of daytime energy during the whole growing stages, indicating that *LE* was the main energy consumption item. The contribution of arid advection to daytime *LE* ranged from 5% to 59% with an average value of 28% at whole growing season. The influence of G_c on *LE* was stronger at the new shoot and leaf-fall stages than that in the middle growing season. (3) *LE* was mainly affected by R_n, followed by vapor pressure deficit (VPD) and air temperature (*Ta*), and the influence degree of VPD and *Ta* on *LE* was similar. Furthermore, the path analysis showed that R_n directly affected *LE*; VPD and *Ta* mainly affected *LE* indirectly through R_n. As a whole, the water and heat fluxes in vineyards of arid desert oasis in Northwest China display significant diurnal and seasonal variations, and the influences of environmental factors on these exists great discrepancies in magnitude and path.

Key words: arid area, grape, water and heat fluxes, arid advection, path analysis, influence factors

农田生态系统是陆地重要的生态系统之一，因其特殊功能性，在作物生产各个环节中受人类活动影响强烈（例如灌溉和耕作），因而成为了涉及水分、热量与物质交换以及水文与生态循环相互作用内在复杂的水文生态系统（Monteith et al., 2008）。农田水热通量传输过程与作物生理生态过程、环境条件有着不可分割的联系（Zhao et al., 2018），研究其水热通量特征是探明农田与大气间相互作用的关键，对合理分配及高效利用水资源至关重要（Wilson et al., 2002）。目前，涡动相关法（eddy covariance, EC）被公认为是研究地表和大气之间的能量、水汽和二氧化碳交换的标准方法（Baldocchi, 2003）。

我国西北干旱内陆区降水很少，属于典型的水资源短缺地区。葡萄是中国西北干旱绿洲区主要经济作物之一，近几年来得到了大量种植（孙文强，2018）。虽然当地具有充足的光照条件满足葡萄生长，但种植葡萄需要大量水进行灌溉来满足其水分需求，水资源的大量需求和资源短缺成为了人们急需解决的问题。管理人员在葡萄园周围种植白杨树作为防护林，以期减少不必要的水分损失（McNaughton, 1988），但是一方面防护林也会消耗水分，另一方面如果不能正确理解干旱绿洲区农田地表水热通量过程，这依然会造成水资源浪费（丁日升等，2014）。同时，绿洲与荒漠之间的平流效应使得葡萄园能量交换过程与环境因子变得更为复杂（Ding et al., 2015），而针对干旱区葡萄园平流效应对水热通量的影响也需进一步定量化研究，这对于我们能否正确理解干旱绿洲区农田地表过程至关重要。

生理因素和环境因素对水热通量有着重要的影响作用。冠层导度（G_c）是影响农田水热通量最主要的作物生理因子，反映了作物对环境的综合响应，也是计算潜热通量模型的关键参数（Monteith et al., 2008）。然而，很少有研究量化干旱内陆区 G_c 对葡萄园水热通量的控制特征。另外，针对环境因子对水热通量的影响，目前研究大多采用的方法大多为简单相关、多元回归分析（阳伏林等，2014; 冯禹等，2018；郑思宇等，2020），但这些方法都无法获得环境因素对水热通量的影响路径。而通径分析将相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数，其经过标准化去掉了单位可以相互比较，从而可以反映各自变量对因变量的影响程度和相对重要性（Zhang et al., 2016）。

基于以上考虑，本研究选择以甘肃敦煌市南湖镇干旱绿洲区无核白葡萄园作为研究对象，基于 EC 系统测定的 2017 年葡萄园水热通量数据，实现以下研究目标：（1）揭示西北干旱区葡萄园在不同生长阶段水热通量变化及分配特征；（2）量化 G_c 和干旱平流对水热通量的影响；（3）使用通径分析明确环境因子对于水热通量的影响机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验于 2017 年生长季（5—10 月）在中国甘肃省敦煌市南湖镇沙漠绿洲区葡萄园进行，试验地位于 94°06′ E、39°55′ N 之间，年平均气温在 9～10 ℃之间，年平均降水量 36.9 mm，海拔在 1 100～1 300 m 之间（王尚涛，2019）。研究区属于暖湿带干旱气候，四季分明，日照时间长，降水少，蒸发强，土壤类型为隐域性土壤，主要有草甸土和盐渍土等，研究区内有较大面积的湿地分布，水源来自党河河床的渗漏补给。

试验样地（450 m×160 m）位于敦煌南湖绿洲西南部，无核白葡萄是当地主要经济作物，葡萄种植株距约 1 m，行间距 3 m，葡萄的熟制是一年一熟，生长季一般为四月底或五月初至九月底或十月初，可以将葡萄全生长季划分为五个生长阶段，即新梢生长期（DOY 121～147 d）、开花坐果期（DOY 148～171 d）、果实膨大期（DOY 172～222 d）、着色成熟期（DOY 223～262 d）、落叶期（DOY 263～283 d）。为保证葡萄正常生长，平均 25 d 左右进行 1 次人工漫灌，土壤水分较为充足。

1.2 涡度通量及环境因子的测定

潜热通量（*LE*）和感热通量（*H*）通过涡度相关（EC）系统测定，该仪器可以在复杂、恶劣的天气条件下正常运行，提供较为精确的测量数据，仪器安装在实验样地中间，距离地面 4 m，基本满足测定对通量贡献区的要求。另外，四个土壤热通量板（HFP01SC，Hukseflux，Netherlands）安装在地面以下 5 cm 处，土壤热通量(*G*)通过平均来自传感器的热通量数据的四个方向来计算。日间净辐射(R_n)采用测量辐射传感器（NR01, Hukseflux, Netherlands）进行测量。以上所有观测到的数据通过数据采集器（CR1000，Campbell，USA）计算并存储，采集时间为 30 min。本研究使用 Eddy Pro6.0 软件对 EC 系统所采集的原始数据进行处理与校正。当一天内数据缺失小于 2 h 时，采用线性插值法进行插补，而对于缺失数据较多的，采用人工神经网络（ANN）进行插补（张琨等，2014）。最终利用处理好的数据进行能量闭合分析（图 1），闭合率达到 87%，这与之前在类似情况下在葡萄园进行的研究结果相当（Ferreira et al., 2012）。

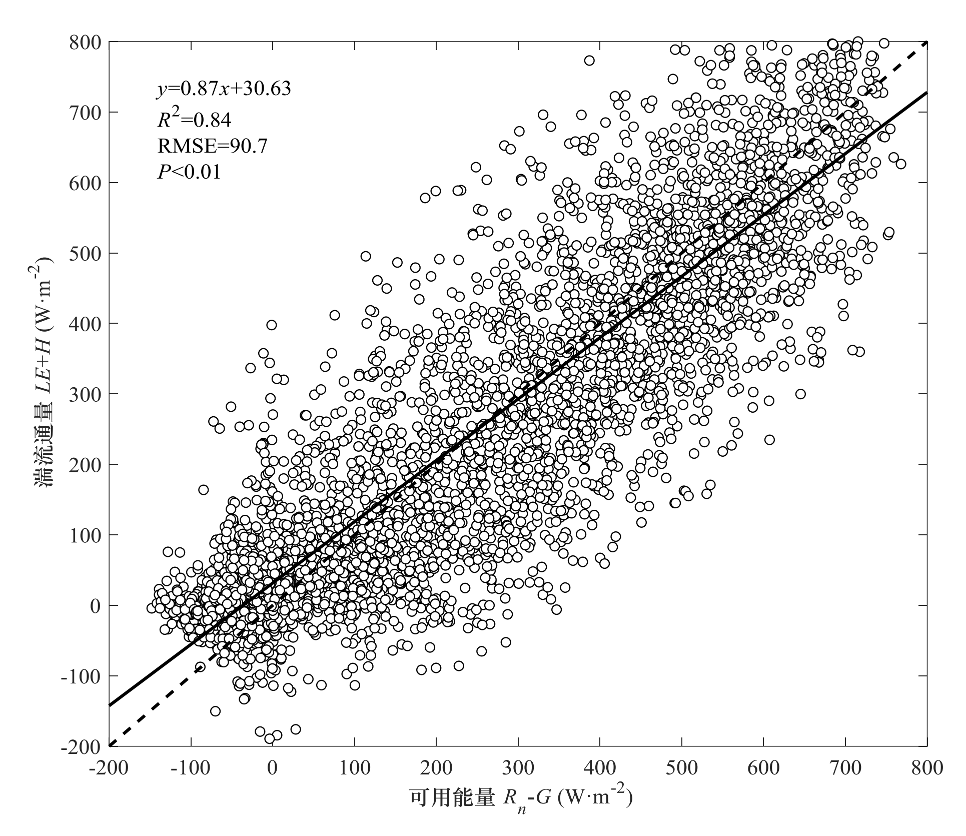


图 1　全生长季半小时能量平衡闭合分析

Fig. 1 Closed analysis of half-hourly energy balance during whole growing season

研究区安装了小型自动气象站，用以测量并记录冠层气温（air temperature，*Ta*，℃）、冠层相对湿度（relative humidity，RH，%）、风速（wind speed，WS，m s^{-1}）、土壤体积含水量（volumetric water content，VWC，m^3m^{-3}）等环境因子。其中，*Ta* 与 RH 的测量采用温湿度传感器（HHMP60, Vaisala, Finland）；WS 采用二维风速仪（5103, R. M. Young, USA）进行测量；VWC 采用土壤水分传感器（ML2x, Delta T, UK）测量。

1.3 指标计算

平流作用对 *LE* 的贡献率（R_{ad}）可由下列式子计算得到（McNaughton, 1976）。

$$R_{ad}=\frac{LE-LE_{eq}}{LE} \quad (1)$$

式中： LE_{eq}为可用能量贡献的平衡蒸散所需的 *LE*，即没有平流的影响下的 *LE*。可由下式计算。

$$LE_{eq}=\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n-G) \quad (2)$$

式中：Δ 为饱和水汽压–温度曲线的斜率（kPa·$°C^{-1}$）；γ 为湿度计常数（kPa·$°C^{-1}$）；R_n 为净辐射（W m^{-2}）；*G* 为土壤热通量（W m^{-2}）。

波文比（β）的计算公式如下：

$$\beta=\frac{H}{LE} \quad (3)$$

为了量化 G_c 对 *LE* 的动态控制程度，Jarvis & McNaughton (1986)通过引入解耦系数（Ω）来量化 *LE* 对 G_c 的响应。

$$\frac{(\mathrm{d}LE/\mathrm{LE})}{(\mathrm{d}G_c/G_c)}=1-\Omega \quad (4)$$

$$\Omega=\frac{(\Delta+\gamma)}{(\Delta+\gamma(1+\frac{G_a}{G_c}))} \quad (5)$$

式中：G_c 为冠层导度；G_a 为空气动力学导度（mm s^{-1}）。两者可由下式计算出来（Monteith et al., 2008）。

$$G_c=\frac{\gamma LEG_a}{\Delta(R_n-G)+\rho_a C_p G_a VPD-LE(\Delta+\gamma)} \quad (6)$$

$$G_a=(\frac{WS}{u_*^2}+6.2u_*^{-2/3})^{-1} \quad (7)$$

式中：*VPD* 为饱和水汽压差（kPa）；*WS* 为风速（m s^{-1}）；ρ_a为空气密度（kg m^{-3}）；C_p为空气的定压比热（MJ kg^{-1}·$°C^{-1}$）；u_*为摩擦风速（m s^{-1}）。

1.4 通径分析

通径分析可将因果变量间的相关系数分为直接作用（直接通径系数）和间接作用（间接通径系数），以研究因果关系的数据结构，分析独立变量对因变量的直接和间接重要性（Kozak et al., 2006）。通径分析采用结构方程模型方法，该模型融合了因素分析与线性回归分析的统计技术对因果模型进行识别估计和验证。本文初步考虑的环境因素有 R_n、*Ta*、VPD、WS、降水和 VWC，经过逐步回归分析筛选出主要环境因素（即通过显著性检验），最终利用通径分析评价主要环境变量（R_n、*Ta*、VPD 和 WS）对 *LE* 的直接和间接影响。

2 结果与分析

2.1 环境状况变化

图 2 为试验期间环境因子季节变化。从图中可以看出，该地区在整个生长季降水次数少

且量少，全生长季仅在 7 月底发生过一次超过 10 mm 的降水，小的降水事件（低于 10 mm）对土壤含水量（VWC）影响很小，但在有效降水事件（大于 10 mm）发生时，VWC 能明显受到影响。此外，由于研究区内定期会进行灌溉，所以 VWC 呈现出周期性下降的特征，灌溉后的最大值为 0.28 m^3 m^{-3}。饱和水汽压差（VPD）在整个生长季上整体呈现出下降趋势，平均最低的是 10 月（0.74 kPa），最高的是 5 月（1.81 kPa）。气温（*Ta*）整体而言都呈先上升后下降趋势，在 7 月达到最大值（23.55 ℃），在 9 月下降至最小值（9.5 ℃）。风速（WS）整体趋势而言比较平稳，但日间波动很大，最大值为 1.23 m s^{-1}，最小值为 0.11 m s^{-1}。大气相对湿度（RH）在整个生长季呈现先上升后下降的趋势，最大为 7 月（55.5 %），最小为 5 月（30.0 %）。葡萄生理因素的解释对于研究水热通量变化也至关重要。叶面积指数（LAI）从生长初期的 0.80 m^2 m^{-2} 增加到了生长中期的 4.10 m^2 m^{-2}，然后逐渐下降到生长末期。冠层导度（G_c）和 LAI 大致呈现出相同变化，G_c 从生长初期的 1.3 mm s^{-1} 增加到生长中期的 12.2 mm s^{-1}（图 2: e）。

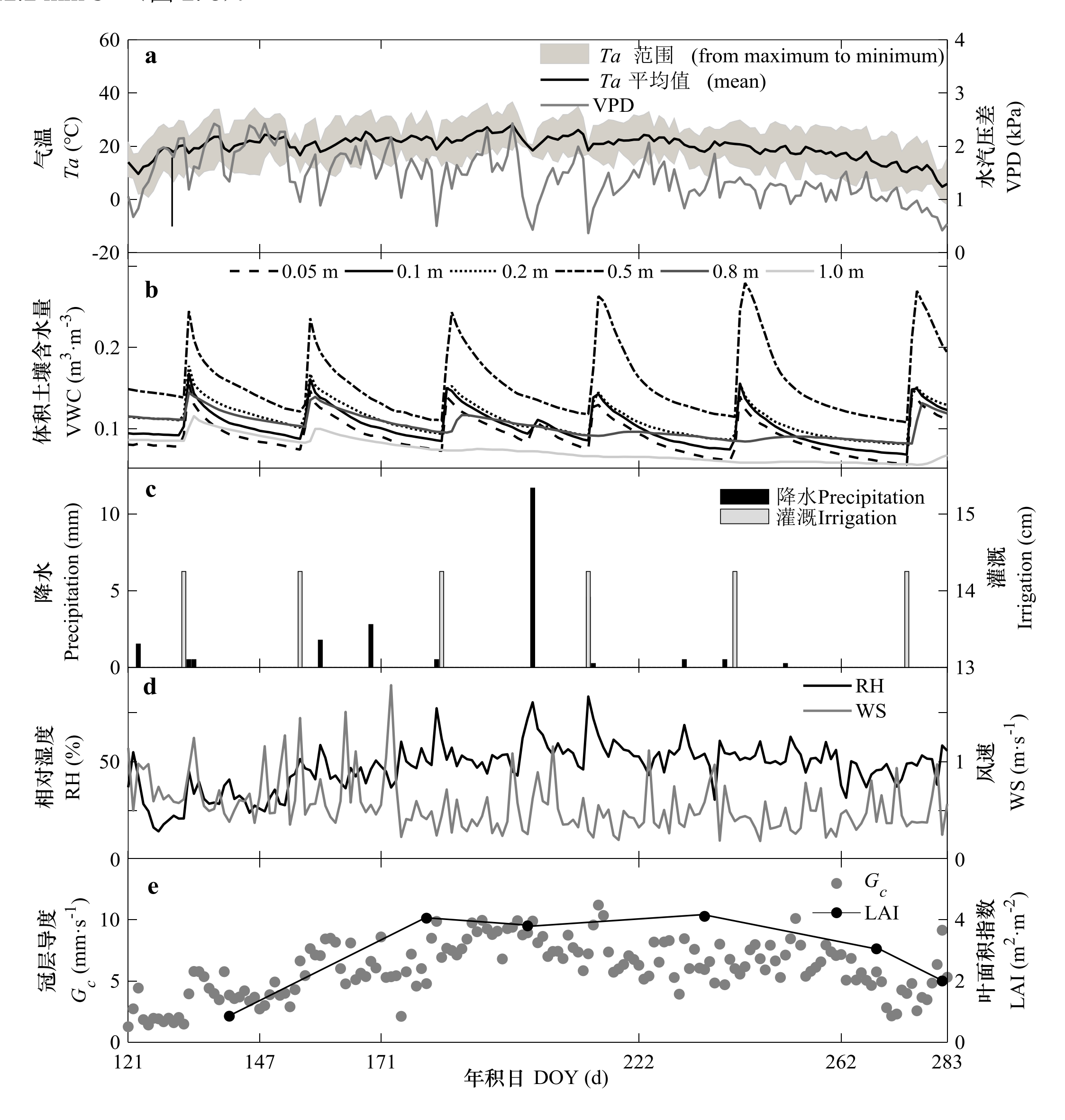
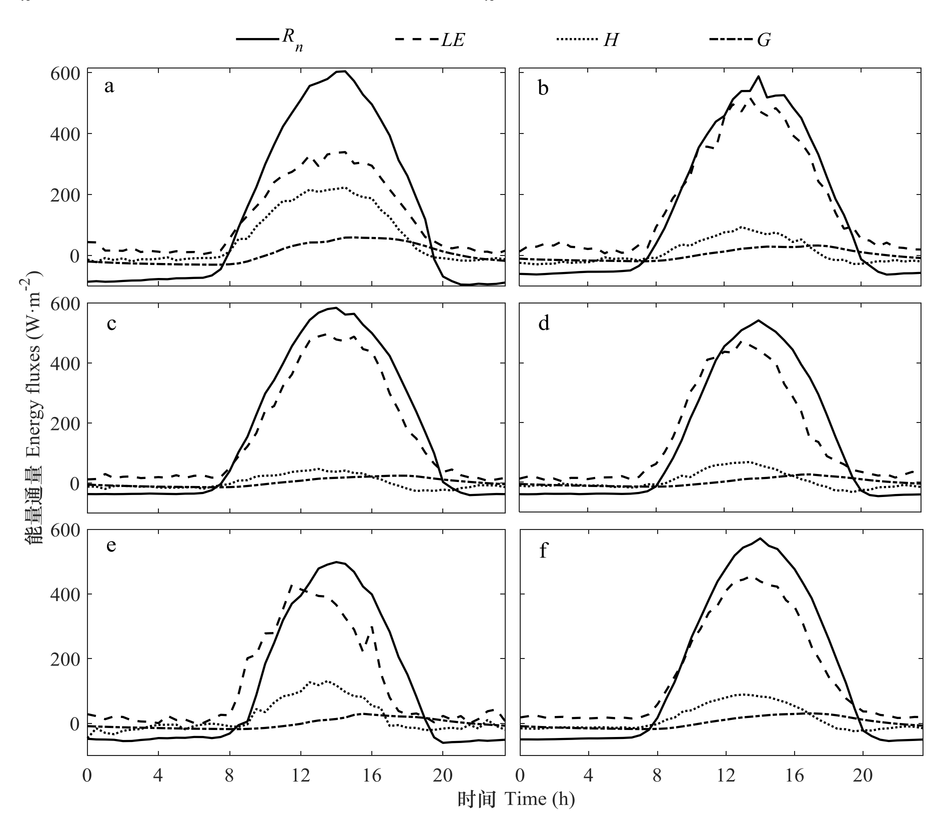


图 2 葡萄园环境因子和生理因子季节变化特征

Fig. 2 Seasonal variation characteristics of vineyard environmental factors and physiological factors

2.2 水热通量变化特征

将各生长阶段的 R_n、*LE*、*H*、*G* 进行日尺度上平均，得到每个生长阶段的水热通量日变化，结果如图 3 所示。*LE* 在各生长阶段变化曲线呈现出不同程度的多峰状，但在全生长季上呈现出单峰状，这主要是各个生长阶段 *LE* 峰值出现时间存在错位导致；R_n、*H* 和 *G* 总体上均呈现出单峰状。各能量分量日间均为正值，夜间除了 *LE*，其他能量分量均在 0 附近且为负值，但不同生长阶段能量分量的正负转换时间不同。*LE* 最大值出现时间波动很大，在 11:30–14:30 之间波动，其中，新梢生长期在 14:30，开花坐果期、果实膨大期在 13:30，着色成熟期在 13:00，落叶期在 14:00；最大值范围是 261.8～517.6 W m^{-2}，各生长阶段依次为 339.3、517.6、496.9、472.2、261.8 W m^{-2}；全生长季上，13:30 最大值出现，为 456.3 W m^{-2}。另外，*LE* 夜间均大于 0，在 3.0～46.1 W m^{-2} 中变化，这可能是夜间由于天气干旱引起的较高 VPD 所致。在新梢生长期，*LE* 的值较小且与 *H* 相近；在其他生长阶段 *LE* 与 *H* 差别很大。*H* 峰值波动范围是 47.5～223.2 W m^{-2}，在 13:00–14:30 之间出现峰值，各生长阶段依次为 223.2、92.9、47.5、67.8、137.9 W m^{-2}；全生长季上，13:30 峰值出现，为 89.0 W m^{-2}。*G* 是 R_n 另外一个能量支出，其变化相对平缓且值很小，峰值波动范围是 24.9～58.9 W m^{-2}，在夜间一般为负值，各生长阶段平均 *G* 分别为 5.1、1.9、2.6、0.4、–1.3 W m^{-2}，表明日尺度 *G* 可以近似认为为零。在不同生长阶段上，R_n 为正值的时间长度呈现先增加后减少的趋势，在果实膨大期最长，达到 12.5 h，在全生长季上为 11.5 h；另外，R_n 的峰值出现在 14:00–14:30 之间，峰值有不同程度波动，峰值波动范围为 449.1～604.8 W m^{-2}，其中，各生长阶段依次为 604.8、588.2、584.3、542.1、449.1 W m^{-2}，这种变化主要是受太阳高度、天空云量以及下垫面作物生长情况等影响；全生长季上，14:00 峰值出现，为 572.1 W m^{-2}。除了新梢生长期，其他生长阶段 R_n 的峰值出现时间均滞后于 *LE* 1 h 左右，其中，在落叶期达到了 2.5 h。另外，R_n 与 *H* 也存在类似的现象，*G* 滞后于 R_n 现象较明显，平均约 2.5 h 左右。



a. 新梢生长期；**b**. 开花坐果期；**c**. 果实膨大期；**d**. 着色成熟期；**e**. 落叶期；**f**. 全生长季。

a. New shoot stage; **b**. Flowering and fruiting stage; **c**. Filling stage; **d**. Maturity stage; **e**. Leaf-fall stage; **f**. Whole growing season.

图 3 葡萄园不同生长阶段水热通量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of water and heat fluxes for the different growth stages of vineyard

为了避免由于 *LE* 和湿度梯度幅度小而造成的夜间测量误差，水热通量的季节变化和干旱平流对其影响的数据分析仅限于白天（Li & Yu, 2007）（R_n>0）。结果如图 4 所示，R_n 在新梢生长期、开花坐果期和果实膨大期处于上升趋势，平均从 316.10 W m^{-2} 上升到 372.11 W m^{-2}，之后在着色成熟期和落叶期呈现出下降趋势。在新梢生长期和开花坐果期，随着葡萄树的生长，有许多新的树枝和葡萄叶长出，*LE* 迅速增加，从 117.82 W m^{-2} 增加至 180.56 W m^{-2}，而 *H* 在这两个时期呈现出明显的下降趋势且降至 0 附近，这就表明在这段时间 R_n 绝大多数转换成了 *LE*。在果实膨大期和着色成熟期，*H* 几乎一致维持在 0 附近，*LE* 始终占据 R_n 的主要成分，并显示出对 R_n 和环境变化相应的变化。在落叶期，随着叶子的褪落，*LE* 逐渐降低，*H* 有所回升。*G* 除了在新梢生长期外，在其他生长阶段均在 0 附近波动，这主要是因为在这个时期内由于葡萄树对地面覆盖度不高，导致地面可以接收到一部分太阳辐射，但值得注意的是，在落叶期 *G* 非得没有回升，反而出现了下降趋势，这可能与 R_n 和 T*a* 在期间降低有关。

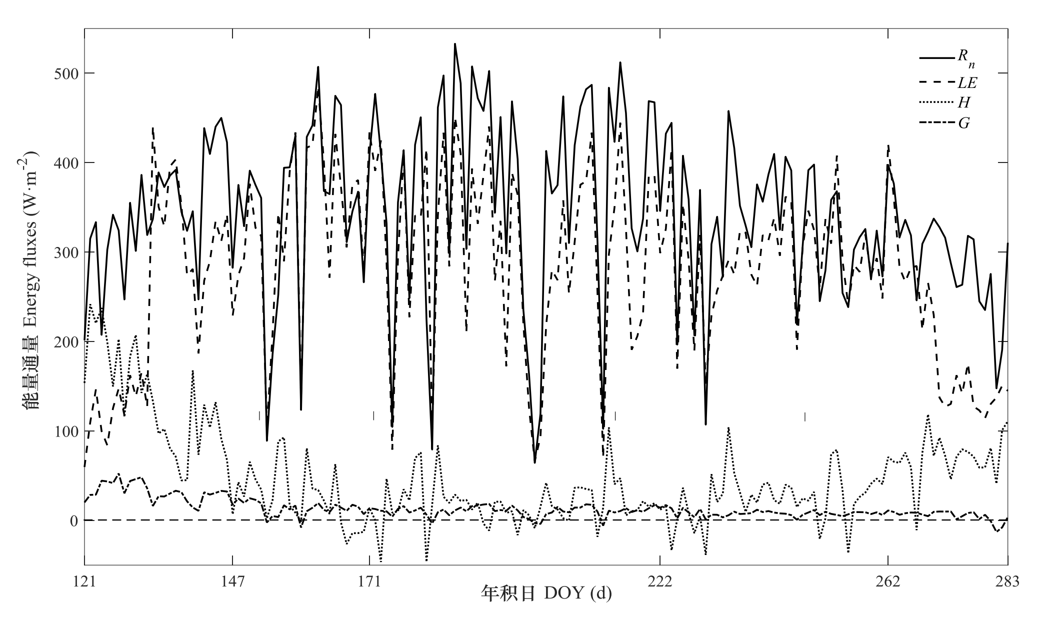


图 4 葡萄园能量日均季节变化

Figure 4 Seasonal variation of daily mean energy of vineyard

LE/(R_n–*G*)、*H*/(R_n–*G*)和 *β* 的季节变化如图 5 和表 1 所示。*LE*/(R_n–*G*)在新梢生长期（0.75）和落叶期（0.70）相对较低，而在中间三个生长阶段都接近 1.0。整个生长季的 *LE*/(R_n–*G*)平均达到 0.86。相比较于 *LE*/(R_n–*G*)，*H*/(R_n–*G*)显示出相反的季节变化趋势，从新梢生长期的 0.45 迅速下降，然后在中间三个生长阶段一直维持在 0 附近，直到落叶期才有所回升。因此，*β* 的季节性变化与 *H* 基本上一致，从新梢生长期的 0.60 下降至 0 附近，然后在落叶期增加到 0.35。*LE*/(R_n–*G*)>1 或 *H*/(R_n–*G*)<0 表明葡萄冠层除了完全消耗可供能量外，还吸收了感热通量用以蒸发水分，即发生了干旱感热平流现象（McNaughton, 1976;Li & Yu, 2007）。然而，在整个生长季中，*LE*/(R_n–*G*)>1 或者 *H*/(R_n–*G*)<0 的天数有 42 d，这表明该葡萄园的水热通量除了受到葡萄生理因素和环境因素之外，还可能受到干旱平流的影响，需要我们进一步研究。

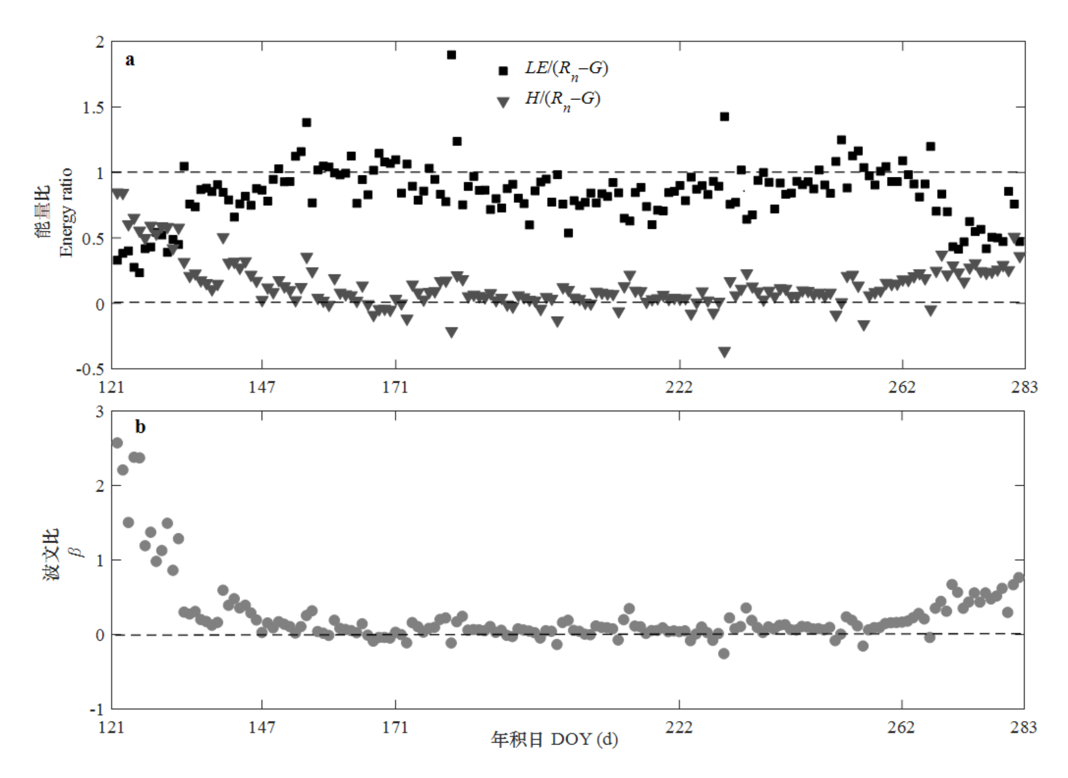


图 5 葡萄园能量日均分配[$LE/(R_n–G)$、$H/(R_n–G)$]、波文比（β）季节变化

Fig. 5 Seasonal changes of daily mean energy distribution [$LE/(R_n–G)$、$H/(R_n–G)$] and Bowen ratio (β) in the vineyard

2.3 水热通量的影响因素分析

2.3.1 冠层导度对水热通量的影响

在整个生长季上，LE 对 G_c 的动态响应和敏感性[即$(dLE/LE)/(dG_c/G_c)=1–\Omega$]发生了较大的变化，从新梢生长阶段初期的 0.75 下降到果实膨大期的 0.40，然后在落叶期又上升到 0.70（图 6）。结果表明气孔对生长季前期和后期 LE 的控制作用强于中期。Monteith & Unsworth (2008)还提出，对于与大气耦合良好的冠层($1–\Omega>0.5$)，气孔控制水分流失；而弱耦合冠层的蒸腾作用受气孔控制较差，主要依赖辐射能。此外，考虑到葡萄冠层 LAI 的剧烈变化(图 2: e)，$1–\Omega$ 在整个生长季是动态的，我们认为这是合理的。

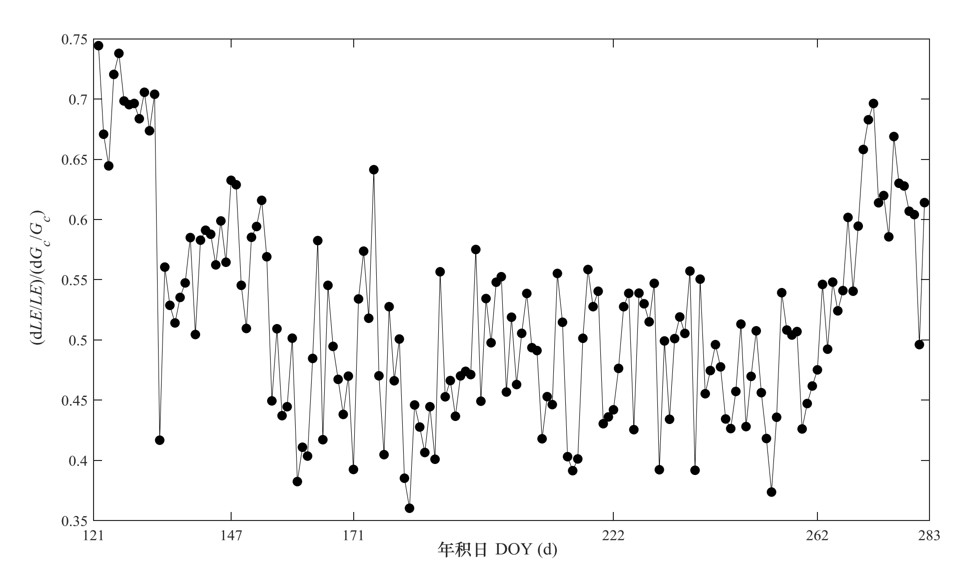


图 6 整个生长季上冠层导度（G_c）对潜热通量（LE）的影响

Fig. 6 Effects of canopy conductance (G_c) on latent heat flux (*LE*) throughout the whole growing season

2.3.2 干旱平流对水热通量的影响

为准确了解干旱平流对水热通量的影响，本文计算了 *LE* 的干旱平流贡献率（R_{ad}），结果如图 7 和表 1 所示。干旱平流对潜热通量的贡献范围在 5%～59%之间，在整个生长季平均为 28%。开花坐果期的干旱平流发生的天数最多（14 d），但新梢生长期发生的干旱平流强度最高（34%）。

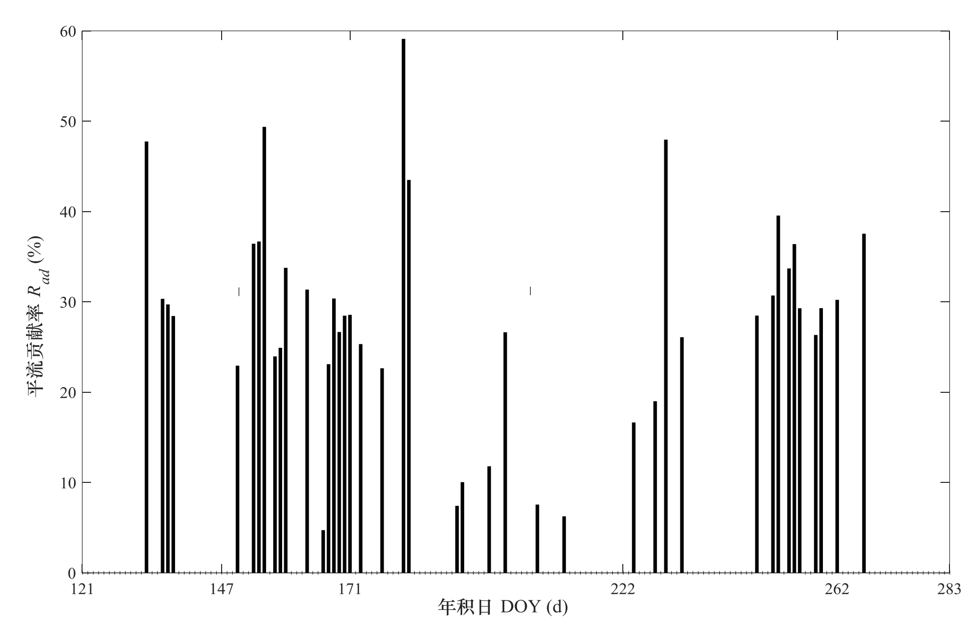


图 7 *LE* 的干旱平流贡献率的季节变化

Fig.7 Seasonal variation of arid advection contribution rate of *LE*

表 1 葡萄园不同生长阶段以及全生长季上水热通量分配规律

Table 1 Distribution of water and heat fluxes at different growth stages and whole growing season of vineyard

生长阶段 Growth stage	能量分量 Energy components（W m^{-2}）				能量比率 Energy ratio（%）			R_{ad}（%）
	R_n	*LE*	*H*	*G*	$LE/(R_n–G)$	$H/(R_n–G)$	β	
新梢生长期 New shoot stage	316.10	212.49	126.83	32.00	0.75	0.45	0.60	34
开花坐果期 Flowering and fruiting stage	346.83	327.59	26.02	13.34	0.98	0.08	0.08	29
果实膨大期 Filling stage	372.11	303.58	19.25	10.41	0.84	0.05	0.06	22
着色成熟期 Maturity stage	329.35	293.00	24.28	8.04	0.91	0.08	0.08	30
落叶期 Leaf-fall stage	293.34	200.40	70.60	5.28	0.70	0.25	0.35	38
全生长季 Whole growing	338.47	279.25	47.17	13.01	0.86	0.14	0.17	28

season

2.3.3 环境因素对水热通量的影响机制

从表 2 中可以看出，由于各环境因子直接和间接共同作用，在前四个生长阶段以及全生长季，对 *LE* 影响的环境因子排序关系（相关系数）均为 R_n>*Ta*>VPD>WS；而在落叶期，对 *LE* 影响的环境因子排序关系为 R_n>VPD>*Ta*>WS，VPD 和 *Ta* 对 *LE* 影响程度差异很小。可以看出 R_n 始终是影响 *LE* 的最主要环境因子，其次是 VPD 和 *Ta*，WS 的影响最小。

直接通径系数和间接通径系数分别表示环境因子通过直接和间接方式对于 *LE* 的影响程度。从表 2 中可以看出，各环境因子直接通径系数绝对值排序在各个生长阶段有所不同，主要还是体现在 *Ta* 和 VPD 的差异上，除了在新梢生长期 *Ta* 大于 VPD 之外，其余时期皆为 VPD 大于 *Ta*，但无论是在各生长阶段还是在全生长季，R_n 最大，WS 最小，这说明 R_n 对半小时尺度 LE 的直接作用最大，而 WS 对于 *LE* 的直接作用最小。此外，无论在各生长阶段，各环境因子只有 R_n 的直接通径系数大于间接通径系数之和，说明 R_n 对半小时尺度 *LE* 的影响主要体现在直接作用上，而其余环境因子均主要体现为间接影响。R_n 对 LE 的间接作用主要通过与 *Ta* 和 VPD 的互相作用产生影响。而 *Ta*、VPD 和 WS 均通过 R_n 对 *LE* 产生影响。

表 2 半小时尺度下潜热通量(*LE*)与净辐射(R_n)、气温(*Ta*)、水汽压差(VPD)和风速(WS)通径分析结果

Table 2 Path analysis results of latent heat flux (*LE*) and net radiation (R_n), air temperature (*Ta*), vapor pressure deficit (VPD) and wind speed (WS) at the half-hourly scale

生长阶段 Growth stage	环境因子 Environmental factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				
				总间接通径系数 Total indirect path coefficient	R_n	*Ta*	VPD	WS
新梢生长期 New shoot stage	R_n	0.818	0.778	0.040	—	0.186	–0.122	–0.024
	Ta	0.603	0.282	0.321	0.512	—	–0.172	–0.019
	VPD	0.587	–0.182	0.769	0.522	0.267	—	–0.020
	WS	0.282	–0.059	0.341	0.314	0.088	–0.061	—
开花坐果期 Flowering and fruiting stage	R_n	0.889	0.886	0.003	—	0.015	–0.018	0.006
	Ta	0.632	0.021	0.611	0.629	—	–0.026	0.008
	VPD	0.587	–0.027	0.614	0.586	0.02	—	0.008
	WS	0.299	0.02	0.279	0.282	0.008	–0.011	—
果实膨大期 Filling stage	R_n	0.881	0.858	0.023	—	–0.193	0.211	0.005
	Ta	0.678	–0.259	0.937	0.642	—	0.288	0.007
	VPD	0.663	0.312	0.351	0.581	–0.239	—	0.009
	WS	0.418	0.014	0.404	0.329	–0.119	0.194	—
着色成熟期 Maturity stage	R_n	0.837	0.924	–0.087	—	–0.037	–0.064	0.014
	Ta	0.535	–0.052	0.587	0.65	—	–0.085	0.021
	VPD	0.529	–0.092	0.621	0.64	–0.048	—	0.028
	WS	0.229	0.046	0.183	0.263	–0.023	–0.057	—
落叶期 Leaf-fall stage	R_n	0.824	0.914	–0.09	—	0.048	–0.09	–0.048
	Ta	0.541	0.172	0.369	0.689	—	–0.369	–0.046
	VPD	0.547	–0.381	0.928	0.813	0.167	—	–0.052
	WS	0.326	–0.091	0.417	0.547	0.088	–0.218	—

全生长季	R_n	0.853	0.838	0.015	—	–0.017	0.027	0.005
Whole	*Ta*	0.593	–0.024	0.617	0.577	—	0.035	0.005
growing	VPD	0.587	0.04	0.547	0.561	–0.021	—	0.007
season	WS	0.321	0.013	0.308	0.296	–0.009	0.021	—

3 讨论

日尺度上，*LE* 变化曲线在各生长阶段呈现出不同程度多峰状，主要是因为中午期间 T*a* 过高，葡萄叶片气孔适度闭合，进入“午休”状态，导致蒸腾作用下降，*LE* 也降低（Zhang et al., 2007；黄天宇等，2019）。*LE* 日变化在全生长季上却呈现单峰状，这主要是 *LE* 在各生长阶段峰值出现时间错位导致。R_n、*H* 和 *G* 日变化总体上均呈现出不同程度单峰状，*H* 在不同生长阶段的日变化区别明显，*G* 变化一直保持平缓状态，研究结果与前人在各种下垫面类型上的结果一致（丁日升等，2014；郑思宇等，2020；余昭君等，2020）。*G* 日变化相对于 R_n 呈现出稳定滞后，黄天宇等（2019）也发现了这一点。各能量分量日间均为正值，夜间除了 *LE*，其他能量分量均在 0 附近且为负值，但不同生长阶段能量分量的正负转换时间不同，这主要是不同生长阶段的环境不同导致。

生长季尺度上，平均 $LE/(R_n–G)$为 86 %，表明 *LE* 是可供能量的主要消耗项。这与已有在华北平原小麦（Lei, 2010）、美国灌溉玉米田（Suyker et al., 2008）和西北干旱区玉米农田（丁日升等，2014；Zhang et al., 2016）的研究结果类似。但与郑思宇等（2020）和余昭君等（2020）研究同为葡萄农田却不在同种地理环境下的研究结果不同，后者表明 *H* 始终占据了能量的主要部分。导致出现这种差异可能是因为：一是本研究区灌溉量充足，导致葡萄蒸腾量变大；二是当地光照条件好，蒸腾拉力较大；三是干旱平流效应的产生，葡萄冠层会利用一部分 *H* 蒸发水分；四是葡萄的冠层结构也会对能量分配产生一定的影响（Kool et al., 2016）。这也说明了环境条件以及种植技术对于水热通量分配影响的重要性。本文还发现干旱平流对水热通量影响显著，全生长季 R_{ad} 在 5%～59%之间，平均达到 28%。Kool 等（2018）对以色列干旱区滴灌葡萄园研究发现全生长季平均 R_{ad} 为 8%，这可能是地理区域以及灌溉技术不同导致。干旱区灌溉良好的苜蓿田中，平流作用对总热量的贡献在 28%～90%之间（Prueger et al., 1996），影响程度远比本研究区大，这说明即使在相近的平流作用下，水分的供应与种植密度会对平流对水热通量的 R_{ad} 产生较大影响（Kool et al., 2018）。但是相比较于在类似环境下的下研究结果，两者之间存在很大的相似，R_{ad} 范围为 1%～50%。

葡萄生理因素和环境因素是影响葡萄园 *LE* 的两个主要方面。生理因素方面，我们发现 G_c 对 *LE* 的影响在整个生长季上是动态的，即 G_c 在生长季初期和末期对葡萄 *LE* 的控制较强，而在中期对 *LE* 的控制较弱。这是由于前期和后期葡萄园 LAI 较低或者葡萄叶片在逐渐衰老，此时地表较干燥或粗糙，叶片表面的 VPD 和上方空气的 VPD 相差不大，所以这个时段 G_c 对 *LE* 的控制较中期强；相反，生长季中期片表面的 VPD 和上方空气的 VPD 相差很大，因此 G_c 对 *LE* 的控制较初期和末期弱（Steduto & Hsiao, 1998; Monteith & Unsworth, 2008）。环境因素方面，通径分析结果表明，*LE* 主要受 R_n 的影响，VPD 和 *Ta* 次之且两者的影响程度相近。R_n 主要通过直接作用方法影响 *LE*，而 VPD 和 *Ta* 主要通过 R_n 路径对 *LE* 产生间接作用，这与 Zhang 等（2016）研究结果一致。太阳辐射既能引起 *Ta* 和 RH 的变化，提高叶片温度，使叶片内外的水汽压差增大，增强蒸腾速率，又能诱导气孔开闭，因此是影响 *LE* 的最主要环境因子（龚雪文等，2018）。VPD 表征了气温与相对湿度的综合作用，是衡量空气干燥程度的重要指标，直接影响葡萄叶片气孔开闭程度，影响葡萄蒸腾，因此是影响 *LE* 的另一个重要环境因子（邱让建等，2018），但其影响方式主要通过 R_n 产生间接影响。另外，通径分析清晰地显示了环境因子之间复杂的作用路径，符合在自然条件下各个环境因子之间是互相存在影响的事实。此外，张雪松等（2018）通过通径分析方法辨识了不同时间尺度潜

热通量影响因子的路径贡献，发现了在不同时间尺度上各环境因子的作用方式存在差异。因此，针对环境因子对于水热通量的影响机制，还需要更进一步的研究。

4 结论

本文基于涡度相关系统测定的葡萄园水热通量数据及通径分析方法，分析了西北干旱绿洲区葡萄园水热通量变化特征及影响因素，主要得出以下结论：

（1）日尺度上，*LE* 在各生长阶段呈现出不同程度多峰状，其余分量总体上呈单峰状。R_n 峰值最大为 604.8 W m^{-2}，*LE* 峰值最大为 517.6 W m^{-2}，*H* 峰值最大为 223.2 W m^{-2}，*G* 峰值最大仅为 58.9 W m^{-2}。夜间 *LE* 始终大于零，其余分量小于零。*G* 较 R_n 呈现出稳定的滞后现象。

（2）全生长季上，*LE* 始终是白天葡萄园可利用能量的主要消耗项；*LE* 和 *H* 分别占生长季上白天可利用能量的 86%和 14%。此外，干旱平流对白天 *LE* 的贡献范围为 5%～59%，全生长季平均贡献为 28%，尤其在开花坐果期较强；干旱平流对日尺度上能量不闭合可以解释一半以上。因此，干旱平流对该研究区水热通量的影响不容忽视。

（3）G_c 对 *LE* 的影响在整个生长季上呈动态变化，且在新梢生长期和落叶期对 *LE* 的影响强于生长季中期。此外，*LE* 主要受 R_n 影响，两者相关系数大于 0.82；VPD 和 *Ta* 次之且两者的影响程度相近；WS 的影响最弱。R_n 主要以直接方式影响 *LE*，而 VPD 和 *Ta* 主要通过 R_n 对 *LE* 产生间接作用。

参考文献：

BALDOCCHI DD, 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future[J]. Glob Change Biol, 9(4): 479–492.

DING RS, KANG SZ, ZHANG YQ, et al., 2014. Characteristics of water vapor and heat fluxes and the controlling factors over an maize field in the arid inland region[J]. J Hydraul Eng, 45(3): 312–319. [丁日升，康绍忠，张彦群，等，2014. 干旱内陆区玉米田水热通量特征及主控因子研究[J]. 水利学报, 45(3): 312–319.]

DING RS, TONG L, LI F, et al., 2015. Variations of crop coefficient and its influencing factors in an arid advective cropland of northwest China[J]. Hydrol Process, 29(2): 239–249.

FENG Y, HAO WP, GAO LL, et al., 2018. Effects of plastic mulch on water and heat flux transfer in rained maize fields[J].Trans Chin Soc Agric Mach, 49(12): 300－313. [冯禹，郝卫平，高丽丽，等，2018. 地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输的影响研究[J]. 农业机械学报，49(12): 300–313.]

FERREIRA MI, SILVESTRE J, CONCEICAO N, 2012. Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques[J]. Irrig Sci, 30(5): 433–447.

GONG XW, LIU H, SUN JS, et al., 2018. Variation of evapotranspiration in different spatial scales for solar greenhouse tomato and its controlling meteorological factors[J]. Trans Chin Soc

Agric Eng, 33(8): 166–175. [龚雪文，刘浩，孙景生，等，2018. 日光温室番茄不同空间尺度蒸散量变化及主控因子分析[J]. 农业工程学报，33(8): 166–175.]

HUANG TY, LIU TX, WANG GL, et al., 2019. Dynamic change of water and heat fluxes and response to environmental factors in Cascade ecological zone[J]. Res Soil Water Conserv, 26 (3): 122–127. [黄天宇，刘廷玺，王冠丽，等，2019. 科尔沁梯级生态带水热通量动态变化及对环境因子的响应[J]. 水土保持研究，26(3): 122–127.]

JARVIS PG, MCNAUGHTON KG., 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from LEaf to region[J]. Advan Ecol Res, 15(1): 1–49.

KOOL D, BEN-GAL A, AGAM N, 2018. Within–field advection enhances evaporation and transpiration in a vineyard in an arid environment[J]. Agric For Meteorol, 255: 104–113.

KOOL D, KUSTAS W, BEN-GAL A, et al., 2016. Energy and evapotranspiration partitioning in a desert vineyard[J]. Agric For Meteorol, 218–219: 277–287.

KOZAK M, KANG MS, 2006. Note on modern path analysis in application to crop science[J]. Commun Biometry Crop Sci, 1(1): 32–34.

LEI H, 2010. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain[J]. Agric For Meteorol, 150(4): 581–589.

LI L, YU Q, 2007. Quantifying the effects of advection on canopy energy budgets and water use efficiency in an irrigated wheat field in the North China Plain[J]. Agric Water Manage, 89(1–2): 116–122.

MCNAUGHTON KG, 1976. Evaporation and advection. II. Evaporation downwind of a boundary separating regions having different surface resistances and available energies[J]. Quart J Roy Meteorol Soc, 102(431): 193–202.

MCNAUGHTON KG, 1988. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate[J]. Agr Ecosyst Environ, 22–23: 17–39.

MONTEITH J, UNSWORTH M, 2008. Principles of environmental physics[M]. 3rd ed., New York, USA: Academic Press.

PRUEGER JH, HIPPS LE, COOPER DI. 1996. Evaporation and the development of the local boundary layer over an irrigated surface in an arid region[J]. Agric For Meteorol, 78(3–4): 223–237.

QIU RJ, YANG ZQ, JING YS, et al., 2018. Analysis of water and heat flux over rice-wheat

rotation field and influencing factors[J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 4(17): 82–88. [邱让建，杨再强，景元书，等，2018. 轮作稻麦田水热通量及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 34(17): 82–88.]

STEDUTO P, HSIAO TC, 1998. Maize canopies under two soil water regimes.III. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index[J]. Agric For Meteorol, 89(3-4): 201–213.

SUN WQ, 2018. Investigation and analysis on production and management of grape growers in Dunhuang city [D]. Lanzhou: Gansu Agriculture University. [孙文强，2018. 敦煌市葡萄种植户生产经营现状调查分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学.]

SUYKER AE, VERMA SB, 2008. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize–based agroecosystem[J]. Agric For Meteorol, 148(3): 417–427.

WANG ST, 2019. Characteristics of evapotranspiration and water up take of grapevine in an arid oasis ecosystem in Northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou University. [王尚涛，2019. 干旱绿洲区农田葡萄树蒸散耗水及水分利用策略研究[D]. 兰州：兰州大学.]

WILSON K, BALDOCCHI D, AUBINET M, et al., 2002. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites[J]. Water Resour Res, 38(12): 30–31.

YANG FL, ZHANG Q, WANG WY, et al., 2014. Evapotranspiration and factors influencing evapotranspiration in the spring wheat farmland of China's Loess Plateau[J]. Acta Ecol Sin, 34(9): 2323–2328. [阳伏林，张强，王文玉，等，2014. 黄土高原春小麦农田蒸散及其影响因素[J]. 生态学报，34(9): 2323–2328.]

YU ZJ, HU XT, RAN H, et al., 2020. Characteristics of water and heat flux in vineyard in semi-humid area and its response to environmental factors[J]. Water Saving Irrig, 4(2):96–101. [余昭君，胡笑涛，冉辉，等，2020. 半湿润地区葡萄园水热通量特征及其对环境因子的响应[J]. 节水灌溉，4(2): 96–101.]

ZHANG BZ, KANG SZ, ZHANG L, et al., 2007. Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method[J]. Hydrol Proc, 21(26): 3635–3641.

ZHANG K, ZHU GF, BAI Y, et al., 2014. Gap filling for evapotranspiration based on BP artificial neural networks[J]. J Lanzhou Univ (Nat Sci Ed) , 50(3): 348－355. [张琨，朱高峰，白岩，等，2014. 基于人工神经网络的涡度相关仪观测蒸散量的数据插补方法[J].兰州大学学报(自然

科学版)，50(3): 348–355.]

ZHANG XS, YAN YL, HU ZH, 2018. Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland[J]. Chin J Agrometeorol, 38(4): 201–210. [张雪松，闫艺兰，胡正华，2018. 不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析[J]. 中国农业气象，38(4): 201–210.]

ZHANG YY, ZHAO WZ, HE JH, et al., 2016. Energy exchange and evapotranspiration over irrigated seed maize agroecosystems in a desert–oasis region，northwest China[J]. Agric For Meteorol, 223: 48–59.

ZHAO P, KANG SZ, LI SE, et al., 2018. Seasonal variations in vineyard ET partitioning and dual crop coefficients correlate with canopy development and surface soil moisture[J]. Agric Water Manage, 197: 19–33.

ZHENG SY, WANG TL, WEI XG, et al., 2020. Characteristics of water-heat flux in vineyard and its response to meteorological factors in solar greenhouse in the Northeast China[J]. Agric Res Arid Areas, 38(4): 200–206. [郑思宇，王铁良，魏新光，等，2020. 东北日光温室葡萄园水热通量特征及其对气象因子的响应[J]. 干旱地区农业研究，38(4): 200–206.]